

Signal Number Estimation Algorithm Based on Uniform Circular Array Antenna

Heui-Seon Park, Hongrae Kim, Suk-seung Hwang[†]



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Signal Number Estimation Algorithm Based on Uniform Circular Array Antenna

Heui-Seon Park¹, Hongrae Kim², Suk-seung Hwang^{3†}

¹Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Department of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

²Soletop Co., Ltd, Daejeon 34051, Korea

³Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, School of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

ABSTRACT

In modern wireless communication systems including beamformers or location-based services (LBS), which employ multiple antenna elements, estimating the number of signals is essential for accurately determining the quality of the communication service. Representative signal number estimation algorithms including the Akaike information criterion (AIC) and minimum description length (MDL) algorithms, which are information theoretical criterion models, determine the number of signals based on a reference value that minimizes each criterion. In general, increasing the number of elements mounted onto the array antenna enhances the performance of estimating the number of signals; however, it increases the computational complexity of the estimation algorithm. In addition, various configurations of array antennas for the increased number of antenna elements should be considered to efficiently utilize them in a limited location. In this paper, we introduce an efficient signal number estimation algorithm based on the beamspace based AIC and MDL techniques that reduce the computational complexity by reducing the dimension of a uniform circular array antenna. Since this algorithm is based on a uniform circular array antenna, it presents the advantages of a circular array antenna. The performance of the proposed signal number estimation algorithm is evaluated through computer simulation examples.

Keywords: signal number estimation, beamspace, AIC, MDL, uniform circular array antenna

1. INTRODUCTION

다수개의 안테나 요소로 구성된 배열 안테나 기반의 현대 무선 통신 시스템에서 다수의 사용자에게 동시에 효율적인 통신 서비스를 제공하기 위해서는 수신신호에 포함된 정확한 신호의 개수를 파악하여야 한다. 예를 들어, 대표적인 도래각 추정 기법인 Multiple Signal Classification (MUSIC) (Schmidt 1986) 알고리즘이나 간섭제거와 같은 배열 안테나 기반 빔형성 관련 기술, 또는

위치기반서비스 (Location based service)와 같은 통신시스템에서 수신신호의 개수 정보가 정확히 파악된 경우에는 우수한 성능을 가질 수 있지만, 그렇지 않은 경우에는 심각한 성능 저하를 유발할 수 있다 (Moghaddam & Jalaei 2012).

대표적인 신호개수 추정 이론으로는 결정 이론적 접근방식과 정보 이론적 접근방식이 있다. 정보 이론적 접근방식은 최대 가능 추정치 (Maximum Likelihood) 기반의 방식으로 가설의 통계적 이론에 기반한 결정 이론적 접근방식에 비해 추정성능이 뛰어나 현재 일반적으로 사용되는 접근방식이다 (Madisetti & Williams 1997). 정보 이론적 접근방식의 대표적인 알고리즘인 Akaike Information Criterion (AIC) (Akaike 1998)와 Minimum Description Length (MDL) (Barron et al. 1998) 알고리즘은 수신 신호의 공분산 행렬의 고유치 분해를 통해 얻어지는 각 고유값을 기준식에 적용하여 최소 기준값을 갖는 고유값의 인덱스를 신호의 개수로 결정한다 (Wax & Kailath 1985, Sekmen & Bingul

Received Feb 10, 2023 Revised Feb 24, 2023 Accepted Feb 27, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: hwangss@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7741 Fax: +82-62-230-6596

Heui-Seon Park <https://orcid.org/0000-0002-0278-8933>

Hongrae Kim <https://orcid.org/0000-0002-4317-3919>

Suk-seung Hwang <https://orcid.org/0000-0002-0482-6868>

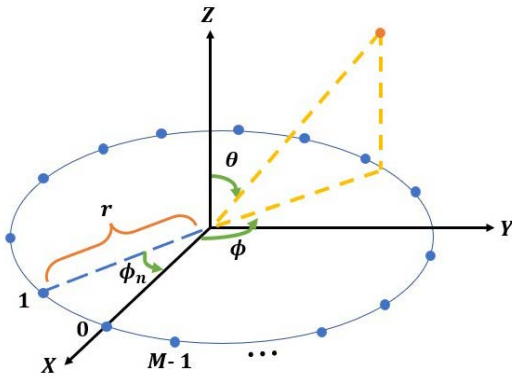


Fig. 1. Structure of uniform circular array antenna.

1999). 따라서, 신호개수 추정 알고리즘은 배열 안테나의 요소 개수가 증가할수록 좋은 추정성능을 보이지만, 그에 따른 계산 복잡도는 기하급수적으로 증가하게 된다 (Valaee & Kabal 2004).

배열 안테나는 제한된 공간이나 그 사용 용도에 따라 다양한 형상이 요구되는데, 원형 배열 안테나의 경우 사각 배열 안테나와 달리 가장자리 요소가 없어 이에 따른 왜곡이 거의 생성되지 않으므로 전 방향으로 효율적인 빔형성이 가능하다 (Ioannides & Balanis 2005). 본 논문은 이러한 원형 배열 안테나의 장점을 가지면서, 다수개의 안테나 요소를 사용하여 생기는 높은 계산 복잡도 문제를 해결하기 위한 균일 원형 배열 안테나 기반의 빔공간 AIC 및 MDL 신호개수 추정 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 빔공간 처리 (beam space processing)를 통해 원형 배열 안테나를 기반으로 모델링된 수신신호의 차원을 축소하고, 축소된 차원의 공분산 행렬을 계산하여 얻은 고유값을 기반으로 신호개수를 추정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 본 논문에서 고려한 원형 배열 안테나의 구조와 수신신호의 수학적 모델을 제시하고, 3장에서 효율적인 신호개수 추정을 위한 제안된 원형 배열 안테나 기반의 빔공간 AIC 및 MDL 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 추정성능 평가 결과를 제시하고, 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 수신신호 모델

이번 장에서는 균일 원형 배열 안테나의 구조 및 수학적 모델을 소개하고, 원형 배열 안테나를 통해 수신된 다양한 신호와 잡음을 포함하는 수신신호 모델을 제시한다. 본 논문에서는 배열 안테나 형상으로 Fig. 1의 구조를 갖는 원형 배열 안테나를 고려한다 (Noordin et al. 2011). 안테나 요소의 개수 및 신호의 개수가 각각 M 과 L 이라고 가정할 때, 샘플 인덱스 k 에 대한 수신신호 모델은 Eq. (1)로 정의된다.

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{A}$ 는 $M \times L$ 크기의 어레이 응답 행렬로 Eq. (2)와 같이 정의된다 (Mathews & Zoltowski 1994).



Fig. 2. Basic block diagram for beam space signal number estimation based on uniform circular array antenna.

$$\mathbf{A} = [\alpha_1(\zeta, \phi), \alpha_2(\zeta, \phi), \dots, \alpha_L(\zeta, \phi)] \quad (2)$$

Eq. (2)에서 각 열의 조향 벡터 (steering vector) $\alpha_l(\zeta, \phi)$ 은 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$\alpha_l(\zeta, \phi) = \begin{bmatrix} e^{j\zeta \cos(\phi_l - \gamma_0)} \\ e^{j\zeta \cos(\phi_l - \gamma_1)} \\ \vdots \\ e^{j\zeta \cos(\phi_l - \gamma_{M-1})} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $l=\{1, \dots, L\}$ 의 값을 갖고, $\zeta = \frac{2\pi}{\lambda} r \sin \theta$ 를 의미한다. λ 와 r 은 각각 파장과 반지름을 나타내며, θ 와 ϕ 는 각각 고도각과 방위각을 나타낸다. $\gamma_m (m=\{0, \dots, M-1\})$ 은 m 번째 안테나 요소의 위치를 의미한다. $\mathbf{s}(k)$ 는 $L \times 1$ 크기의 신호 벡터, $\mathbf{n}(k)$ 는 independent and identically distribute (i.i.d) 특성과 평균 '0', 분산 ' σ^2 '을 가지는 $M \times 1$ 크기의 Additive White Gaussian Noise (AWGN) 벡터이다.

3. 빔공간 기반 신호개수 추정 알고리즘

이번 장에서는 원형 배열 안테나를 통해 수신된 신호의 차원을 줄이기 위한 빔공간 처리와 빔공간 처리 출력에 대한 공분산 행렬을 기반으로 신호의 개수를 추정하는 빔공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘으로 구성된, 원형 배열 안테나 기반 빔공간 신호개수 추정 기술을 소개한다. Fig. 2는 제안된 신호개수 추정 기술에 대한 기본 블록 다이어그램이다.

3.1 빔공간 처리 (Processing)

안테나 배열의 구조가 균일 선형 배열 (Uniform linear array) 또는 균일 사각 배열 (Uniform rectangular array)과 같은 선형 배열 기반인 경우에는 조향 벡터가 방데르몽드 행렬 (Vandermonde matrix)의 형태를 만족하여, 고유값 분해 방법을 통한 다양한 신호처리가 가능하다. 그러나 원형 배열 안테나의 조향 벡터는 요소공간에서 방데르몽드의 구조를 따르지 않아 가상의 균일 선형 배열로 변환하는 작업이 필요한데, 위상 모드 개념을 활용한 빔공간 처리를 통해 방데르몽드 행렬을 만족하는 신호 모델로 변환될 수 있다 (Häfner et al. 2019).

균일 원형 배열 안테나의 빔공간 조향 벡터에 대한 식은 Eq. (4)로 나타낼 수 있다 (Belloni & Koivunen 2004).

$$\alpha_B(\zeta, \phi) = \mathbf{W}_B^H \alpha_l(\zeta, \phi) \approx \sqrt{M} \mathbf{J}_\zeta \mathbf{d}(\phi_l) \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{W}_B$ 는 $M \times B$ 크기의 빔공간 가중치 행렬로 Eq. (5)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{W}_B^H \triangleq \mathbf{C}_v \mathbf{V}^H \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{C}_v$ 는 빙공간 가중치 행렬의 크기 조절을 위한 대각 스케일 행렬이고, $\mathbf{V}$ 는 가중치 행렬로, 각각 Eqs. (6)과 (7)로 정의할 수 있다.

$$\mathbf{C}_v = \text{diag}\{j^{-B_m}, \dots, j^{-1}, 1, j^{-1}, \dots, j^{-B_m}\} \quad (6)$$

$$\mathbf{V} = \sqrt{M}[\mathbf{w}_{-B_m} : \dots : \mathbf{w}_0 : \dots : \mathbf{w}_{B_m}] \quad (7)$$

Eq. (7)에서 $\mathbf{w}_b$ 는 위상모드가 $b \in [-B_m, B_m]$ 인 정규화된 빙공간 가중치 행렬을 의미하며 Eq. (8)로 정의된다.

$$\mathbf{w}_b^H = \frac{1}{M} \left[1, e^{-j\frac{2\pi b}{M}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi b(M-1)}{M}} \right] \quad (8)$$

Eq. (4)에서 $\sqrt{M}\mathbf{J}_\zeta \mathbf{d}(\phi_l)$ 는 방데르몽드 구조를 갖는 빙공간에서의 조향 벡터를 의미하며, $\mathbf{J}_\zeta$ 는 베셀 함수 (Bessel function)을 의미하고, 이는 각각 Eqs. (9)와 (10)과 같이 정의된다 (Zhao et al. 2021).

$$\mathbf{d}(\phi_l) = [e^{-jB_m\phi_l}, \dots, e^{-j\phi_l}, 1, e^{j\phi_l}, \dots, e^{jB_m\phi_l}]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{J}_\zeta = \text{diag}\{J_{B_m}(\zeta), \dots, J_1(\zeta), J_0(\zeta), J_1(\zeta), \dots, J_{B_m}(\zeta)\} \quad (10)$$

앞에서의 계산을 통해 균일 원형 배열 안테나에서 임의의 B 차원 빙공간 출력신호 모델은 Eq. (11)로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_B(k) = \mathbf{W}_B^H \mathbf{x}(k) = \sqrt{M}\mathbf{J}_\zeta \mathbf{D}(\phi) \mathbf{s}(k) + \mathbf{W}_B^H \mathbf{n}(k) \quad (11)$$

여기서 $\mathbf{D}(\phi)=[\mathbf{d}(\phi_1), \mathbf{d}(\phi_2), \dots, \mathbf{d}(\phi_L)]$ 는 방데르몽드 구조를 만족하는 centro-Hermitian 행렬이다.

이와 같은 과정을 거쳐 얻은 Eq. (11)의 빙공간 처리 출력은 차원이 원형 배열 안테나 수신신호의 M 차원에서 B 차원으로 축소되어, 수신신호의 개수를 낮은 계산 복잡도를 가지고 효율적으로 추정하게 된다. 또한, Eq. (11)은 방데르몽드 구조를 만족시키므로, 균일 선형 배열에 적용가능한 다양한 신호처리 기법을 이용할 수 있다.

3.2 빙공간 기반 신호개수 추정

신호개수를 추정하기 위해서는 해당 수신신호에 대한 공분산 행렬을 계산하여야 하는데, 균일 원형 배열 안테나 기반 빙공간 출력의 샘플 공분산 행렬은 Eq. (12)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{R}_B = E[\mathbf{y}_B(k)\mathbf{y}_B^H(k)] = M\mathbf{J}_\zeta \mathbf{D}(\phi) \mathbf{R}_s \mathbf{D}^H(\phi) \mathbf{J}_\zeta + \sigma^2 \mathbf{I}_B \quad (12)$$

여기서 $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{s}(k)\mathbf{s}^H(k)]$ 는 신호에 대한 공분산 행렬이고, $\mathbf{I}_B$ 는 $B \times B$ 크기의 단위행렬을 의미한다. 공분산 행렬의 고유치 분해를 통해 총 B 개의 빙공간 고유값을 얻을 수 있는데, 이는 신호에 대한 L 개의 빙공간 고유값과 잡음에 대한 $B-L$ 개의 빙공간 고유값으로 나눌 수 있다.

3.2.1 빙공간 기반 AIC

신호의 개수를 추정하기 위한 빙공간 기반 AIC 알고리즘의 기준식 (criteria)은 Eq. (13)과 같이 정의된다.

$$AIC(L) = -2N \ln \left[\frac{\prod_{i=L+1}^B \alpha_i}{\left[\frac{1}{B-L} \sum_{i=L+1}^B \alpha_i \right]^{B-L}} \right] + 2L(2B-L) \quad (13)$$

여기서 $L=\{0,1,\dots,B-1\}$ 의 값을 갖고, N 은 샘플 개수를 의미하며, α_i 는 i 번째 고유값을 나타낸다. Eq. (13)의 결과를 최소로 하는 L 값을 수신신호에 포함된 신호의 개수로 결정한다.

3.2.2 빙공간 기반 MDL

신호의 개수를 추정하기 위한 빙공간 기반 MDL 알고리즘의 기준식은 Eq. (14)와 같이 정의된다.

$$MDL(L) = -N \ln \left[\frac{\prod_{i=L+1}^B \alpha_i}{\left[\frac{1}{B-L} \sum_{i=L+1}^B \alpha_i \right]^{B-L}} \right] + \frac{1}{2} L(2B-L) \ln N \quad (14)$$

빙공간 기반 AIC 알고리즘과 마찬가지로 Eq. (14)의 결과를 최소로 하는 L 값을 수신신호에 포함된 신호의 개수로 결정한다.

AIC와 MDL 알고리즘은 Signal to Noise Ratio (SNR) 레벨이나 샘플 개수 등 다양한 조건에 따라 추정 성능이 달라질 수 있으므로, 두 알고리즘을 상호 보완적으로 사용하여야 한다 (Zhang et al. 1989). 본 논문에서 제안된 원형 배열 안테나 기반의 빙공간 AIC 및 MDL 알고리즘은 기존의 일반적인 AIC 및 MDL 알고리즘에 비해 유사한 성능을 가지면서 월등히 낮은 계산 복잡도와 원형 배열 안테나의 장점을 가지는 효율적인 신호개수 추정 알고리즘이라 할 수 있다.

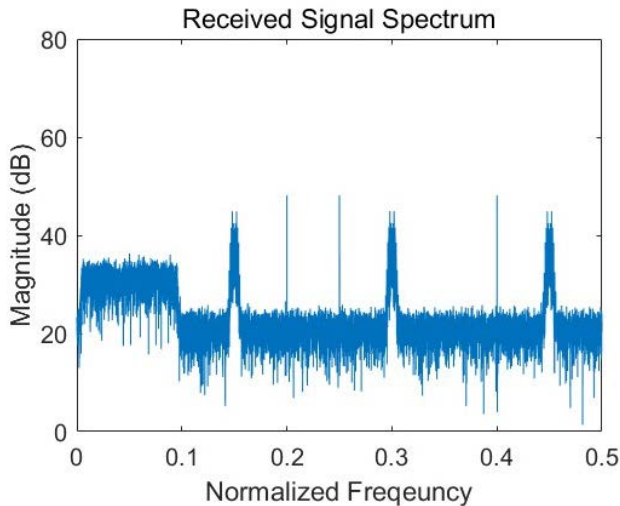
4. 컴퓨터 시뮬레이션

이번 장에서는 제안된 원형 배열 안테나 기반 신호개수 추정 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 2가지 시나리오를 고려한다. 첫번째 시나리오는 원형 배열 안테나 요소의 개수는 20개이고, 빙공간 개수는 9개이다. 사용한 신호의 개수는 총 7개로, 3개의 Continuous Wave (CW) 신호, 3개의 Frequency Modulation (FM) 신호, 1개의 Wideband (WB) 잡음신호가 포함되어 있다고 가정한다. 두 번째 시나리오는 원형 배열 안테나 요소의 개수는 20개, 빙공간 개수는 15개이다. 사용한 신호의 개수는 총 10개로, 5개의 CW 신호, 4개의 FM 신호, 1개의 WB 잡음신호가 포함되어 있다고 가정한다. 각 시나리오에 대한 수신신호 파라미터는 Tables 1과 2에 요약되어 있다.

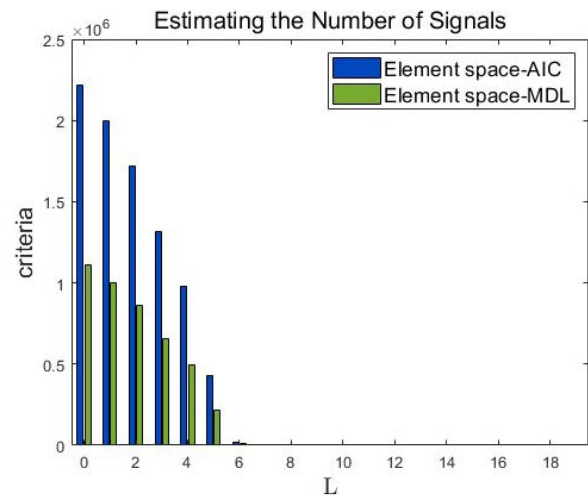
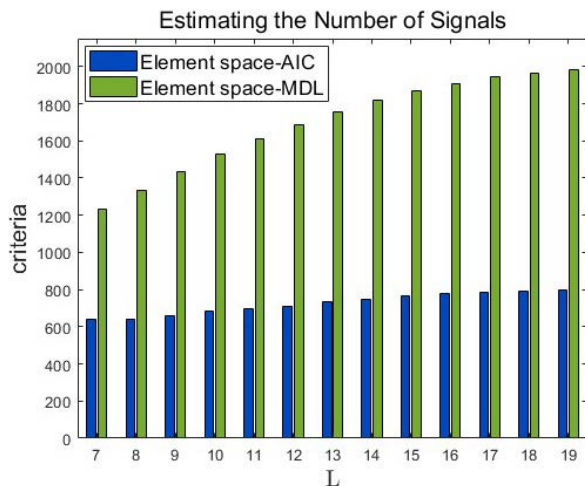
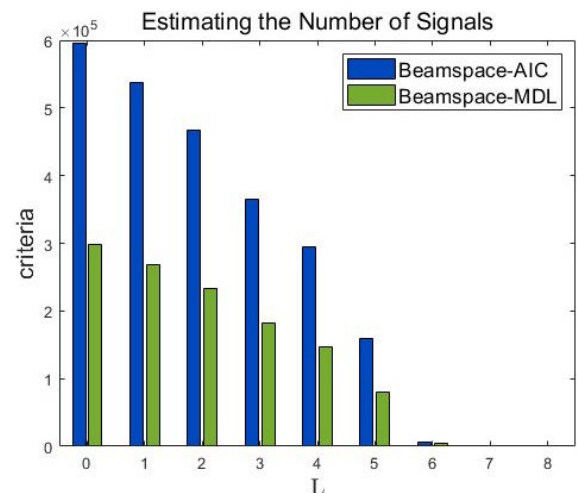
Fig. 3은 총 7개의 신호를 확인할 수 있는 첫 번째 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼을 보여준다. Fig. 4는 첫 번째 시나리오에서 신호개수(L)에 대한 빙공간 처리 이전의 수신신호 차원을 가지는 요소공간 기반 AIC 및 MDL 기준값을 나타낸다. Fig. 4에서 L 이 7 이상인 경우의 기준값이 6 이하인 경우보다 매우 작은 그래프에서 확인하기 어려워, 그래프를 확대하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 L 이 7일 때 AIC 및 MDL 기준값이 모두 최

Table 1. Parameters of the received signal for the first scenario.

Signal	Center frequency	Modulation index	SNR (dB)
CW	0.2, 0.25, 0.4	-	10
FM	0.15, 0.3, 0.45	0.05	10
WB	0.05	-	10

**Fig. 3.** Spectrum of the received signal for the first scenario.**Table 2.** Parameters of the received signal for the second scenario.

Signal	Center frequency	Modulation index	SNR (dB)
CW	0.02, 0.1, 0.35, 0.4, 0.47	-	10
FM	0.05, 0.13, 0.3, 0.45	0.05	10
WB	0.2	-	10

**Fig. 4.** Element space based AIC & MDL criterion for uniform circular array in the first scenario.**Fig. 5.** Extended version of Fig. 4.**Fig. 6.** Beam space based AIC & MDL criterion for uniform circular array in the first scenario.

소값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 이때의 L 값을 신호의 개수로 결정한다.

Fig. 6은 첫 번째 시나리오에서 신호개수에 대한 빔공간 기반 AIC 및 MDL 기준값을 나타낸다. Fig. 4에서와 마찬가지로, Fig. 6에서 L 이 7 이상인 경우의 기준값이 6 이하인 경우의 기준값과 차이가 매우 커 한 그래프에서 확인이 어려우므로, Fig. 6을 확대하여 L 이 7보다 큰 경우의 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 L 이 7일 때 AIC 및 MDL 기준값이 최소값을 가지는 것을 확인할 수 있고, 이때의 L 값을 신호의 개수로 결정한다.

Fig. 8은 총 10개의 신호가 포함된 두 번째 시나리오에 대한 수

신신호 스펙트럼을 보여준다. Fig. 9는 두 번째 시나리오에서 신호개수(L)에 대한 요소공간 기반 AIC 및 MDL 기준값을 나타낸다. Fig. 9에서 L 이 9 이상인 경우의 기준값이 8 이하인 경우에 비해 매우 작아 한 그래프에서 확인이 어려우므로, Fig. 9를 확대하여 L 이 9 이상인 경우의 그래프를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 L 이 10일 때 AIC 및 MDL 기준값이 모두 최소값을 가지는 것을 확인할 수 있고, 이때의 L 값을 신호의 개수로 결정한다.

Fig. 11은 두 번째 시나리오에서 신호개수에 대한 빔공간 기반 AIC 및 MDL 기준값을 나타낸다. Fig. 11에서 L 이 9 이상인 경우의 기준값이 8 이하인 경우보다 매우 작아 한 그래프에서 확인이 어

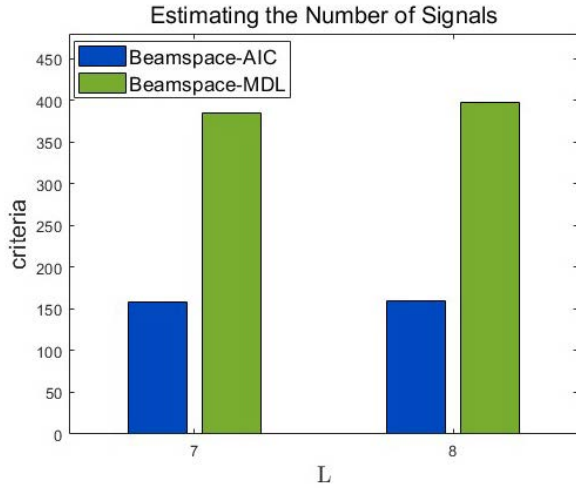


Fig. 7. Extended version of Fig. 6.

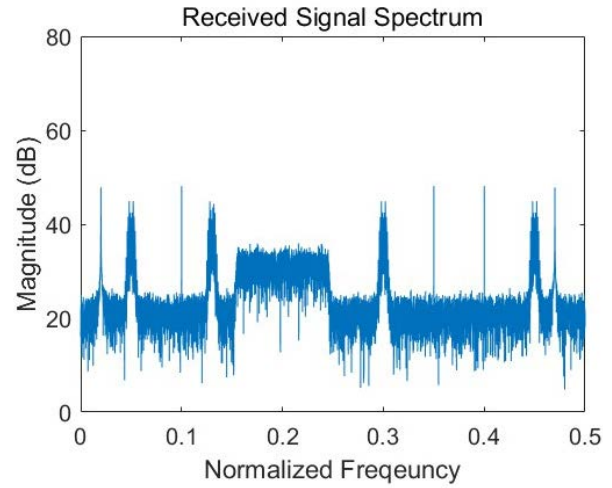


Fig. 8. Spectrum of the received signal for the second scenario.

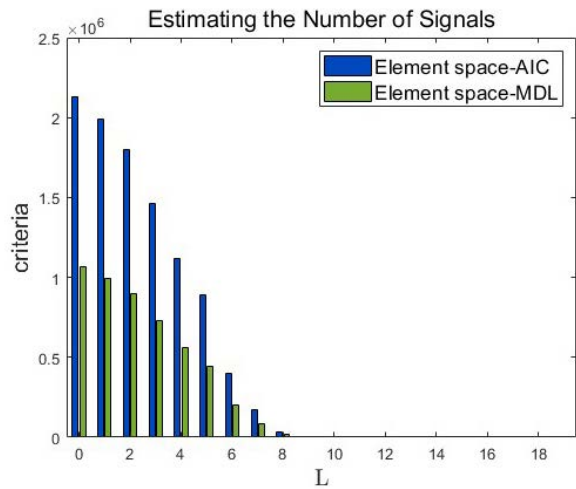


Fig. 9. Element space based AIC & MDL criterion for uniform circular array in the second scenario.

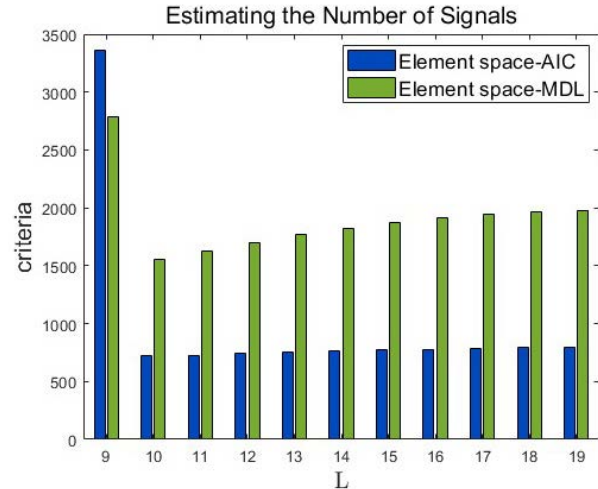


Fig. 10. Extended version of Fig. 9.

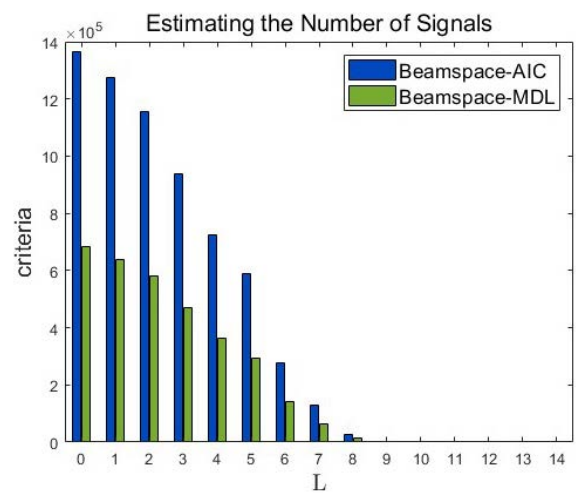


Fig. 11. Beam space based AIC & MDL criterion for uniform circular array in the second scenario.

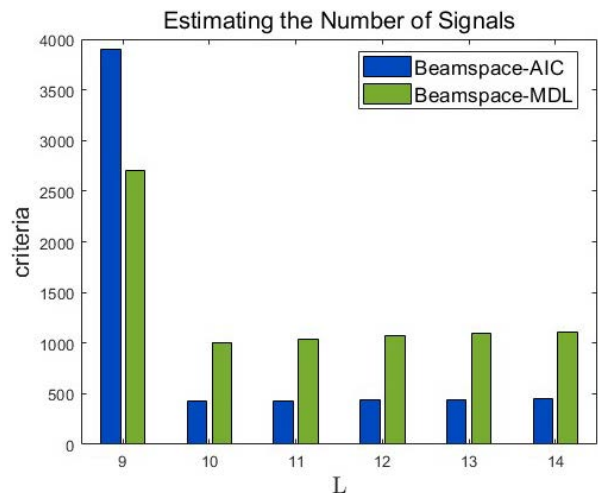


Fig. 12. Extended version of Fig. 11.

려우므로, Fig. 11을 확대하여 L 이 9 이상인 경우의 그래프를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 L 이 10일 때 AIC 및 MDL 기준값이 모두 최소값을 가지는 것을 확인할 수 있고, 이때의 L 값을 수신신호에 포함된 신호의 개수로 결정한다.

위의 결과들로부터, 제안된 균일 원형 배열 안테나 기반 빔공간 신호개수 추정 알고리즘이 수신신호에 포함된 신호의 개수를 정확하게 추정하는 것을 확인할 수 있다. 제안된 알고리즘은 일반적인 AIC 및 MDL 알고리즘과 비슷한 성능을 보이지만, 균일 원형 배열 안테나 기반의 수신신호의 차원이 M 에서 B 로 축소되어 공분산 행렬 계산을 비롯한 신호개수를 추정하기 위한 계산 복잡도를 현저하게 낮추어 효율적으로 신호의 개수를 추정할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 빔공간 처리를 통해 균일 원형 배열 안테나의 차원을 줄여 효율적으로 신호의 개수를 추정하는 원형 배열 안테나 기반 빔공간 AIC 및 MDL 알고리즘을 제안하였다. 원형 배열 안테나를 통해 수신된 수신신호를 빔공간 처리를 통해 그 차원을 축소하고, 빔공간 처리 출력에 대한 공분산 행렬을 계산한다. 계산된 공분산 행렬을 기반으로 AIC와 MDL 알고리즘을 활용하여, 수신신호에 포함된 신호의 개수를 정확하게 추정한다. 제안된 빔공간 기반 신호개수 추정 알고리즘은, 기존의 알고리즘에 비해 유사한 추정성능을 가지면서 계산 복잡도는 현저히 낮고, 균일 원형 배열 안테나의 장점이 필요한 통신시스템에 효율적으로 활용될 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 신호개수 추정 알고리즘의 성능을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 연구는 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업임 (No.915027201).

이 논문은 2022년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H. S. Park., H. R. Kim. and S. Hwang.; methodology, H. S. Park., H. R. Kim. and S. Hwang.; software, H. S. Park.; validation, H. S. Park.; formal analysis, H. S. Park.; investigation, H. S. Park. and S. Hwang.; writing—original draft preparation, H. S. Park.; writing—review and editing, S. Hwang.; supervision; S. Hwang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Akaike, H. 1998, Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, In Parzen, E., Tanabe, K., Kitagawa, G. (eds) Selected papers of Hirotugu Akaike, Springer Series in Statistics (New York: Springer), pp.199–213. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0_15
- Barron, A., Rissanen, J., & Yu, B. 1998, The minimum description length principle in coding and modeling, IEEE Transactions on Information Theory, 44, 2743–2760. <https://doi.org/10.1109/18.720554>
- Belloni, F. & Koivunen, V. 2004, Analysis of Beam-space Transform on Uniform Circular Array, In Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 7–10 November 2004, Pacific Grove, CA, USA, pp. 1963–1967. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2004.1399507>
- Häfner, S., Käske, M., & Thomä, R. 2019, On Calibration and Direction Finding with Uniform Circular Arrays, International Journal of Antennas and Propagation, 2019, 1523469. <https://doi.org/10.1155/2019/1523469>
- Ioannides, P. & Balanis, C. A. 2005, Uniform circular and rectangular arrays for adaptive beamforming applications, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 4, 351–354. <http://doi.org/10.1109/LAWP.2005.857039>
- Madisetti, V. & Williams, D. B. 1997, The digital signal processing handbook (Boca Raton: CRC press)
- Mathews, C. P. & Zoltowski, M. D. 1994, Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays, In IEEE Transactions on Signal Processing, 42, 2395–2407. <https://doi.org/10.1109/78.317861>
- Moghaddam, S. S. & Jalaei, S. 2012, Determining the Number of Coherent/Correlated Sources Using FBSS-based Methods, Frontiers in Science, 2, 203–208. <https://doi.org/10.5923/j.fs.20120206.12>
- Noordin, N. H., Zuniga, V., El-Rayis, A. O., Haridas, N., Erdogan, A. T., et al. 2011, Uniform Circular Arrays for Phased Array Antenna, 2011 Loughborough Antennas & Propagation Conference, Loughborough, UK, 14–15 November 2011, pp.1–4. <https://doi.org/10.1109/LAPC.2011.6114031>
- Schmidt, R. 1986, Multiple emitter location and signal parameter estimation, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34, 276–280, <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>

- Sekmen, A. S. & Bingul, Z. 1999, Comparison of algorithms for detection of the number of signal sources, In Proceedings IEEE Southeastcon'99. Technology on the Brink of 2000 (Cat. No.99CH36300), Lexington, KY, USA, 25-28 March 1999, pp.70-73. <https://doi.org/10.1109/SECON.1999.766094>
- Valaee, S. & Kabal, P. 2004, An information theoretic approach to source enumeration in array signal processing, In IEEE Transactions on Signal Processing, 52, 1171-1178. <https://doi.org/10.1109/TSP.2004.826168>
- Wax, M. & Kailath T. 1985, Detection of signals by information theoretic criteria, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 33, 387-392. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1985.1164557>
- Zhang, Q. -T., Wong, K. M., Yip, P. C., & Reilly, J. P. 1989, Statistical analysis of the performance of information theoretic criteria in the detection of the number of signals in array processing, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 37, 1557-1567. <https://doi.org/10.1109/29.35394>
- Zhao, D., Tan, W., Deng, Z., & Li, G. 2021, Low complexity sparse beamspace DOA estimation via single measurement vectors for uniform circular array, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2021, 54. <https://doi.org/10.1186/s13634-021-00770-2>



Heui-Seon Park received the B.S. degree in Electronic Engineering from Chosun University, Gwangju, Korea, in 2021, where she is currently pursuing the M.S. degree with the Department of Electronic Engineering. Her current research interests include adaptive signal processing and signal number estimation algorithms.



Hongrae Kim received the B.S., M.S. the Ph.D. degrees in Aerospace Engineering from Korea Aerospace University, in 2010, 2012, and 2019, respectively. He joined Soletop Co., Ltd. in 2015 and is the team leader of the microsatellite research team. His interests are microsatellite mission/system development and related technologies. Also, he is involved in a variety of projects ranging from 2U satellites to microsatellites.



Suk-seung Hwang received the B.S. degree in Control and Instrumentation Engineering from Kwang-Woon University, Seoul, in 1997, and the M.S. and Ph.D. degrees in Electrical and Computer Engineering from the University of California, Santa Barbara (UCSB), in 2001 and 2006, respectively. At UCSB, his interests included adaptive signal processing applied to wireless communications, interference cancellation for GPS, and adaptive algorithms for an optical switch. He was a Teaching Assistant and a Graduate Student Researcher from 1999 to 2006. From 2006 to 2008, he was a Senior Engineer with the Telecommunication R&D Center, Samsung Electronics Company, Ltd., Suwon, Korea. At Samsung, his research interests included smart antennas and MIMO, channel estimation, and location-based service algorithms. From 2008 to 2014, he was with the Department of Mechatronics Engineering, and since 2014, he has been with the Department of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea, where he is currently a professor. His current research interests include adaptive signal processing for wireless communications and interference suppression, location detection technology (LDT) based on GPS and non-GPS, and wireless communications for a tire-pressure monitoring system (TPMS).